

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180512

计及时滞环节的孤岛微电网控制器参数优化研究

刘一鸣¹, 李彦哲¹, 董海鹰¹, 马喜平²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 小信号模型是微电网控制器参数优化的基础。目前小信号模型是利用一个简化传递函数模型来进行研究, 然而分布式电源(DG)在功率调节所建立的小信号模型中还存在时滞问题, 特别是逆变器当中变流器功率响应的固有时滞即 PWM 时滞和数字电路采集方面的时滞问题。为此, 不同于传统方法对微电网参数进行优化, 而是建立含有时滞模型的小干扰信号模型, 然后再进行控制器参数优化。通过对比考虑时滞的方法以及传统方法的差异, 揭示参数不同对于系统稳定性的影响, 从而提出含有时滞系统的微电网参数优化方法。通过建立含有 2 个 DG 的并联微电网孤岛系统, 比较了系统特性的差异, 验证了所提方法的合理性和优越性。

关键词: 孤岛微电网; 时滞系统; 小信号模型; 参数优化; 系统稳定性

Study on parameter optimization of islanded microgrid with time delay

LIU Yiming¹, LI Yanzhe¹, DONG Haiying¹, MA Xiping²

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The small signal model is the basis of microgrid parameter optimization, which usually employs a simplified transfer function model to conduct research. However, the small signal model of Distributed Generation (DG) based on power regulation has time delay problems, especially the inherent time delay of the inverter's power response namely PWM delay and the acquisition delay of digital circuits. Therefore, differing from the traditional microgrid parameter optimization, a small signal model with time delay effect is established for the microgrid parameter optimization. By comparing the method with time delay considered and the traditional method, the different effects upon the system stability of different parameters are revealed, and the microgrid parameter optimization with time delay system is proposed. With simulations conducted upon the parallel islanded microgrid system with 2 DGs, the characteristic differences of systems are compared and the rationality and superiority of the proposed method is verified.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61663019) and Science and Technology Project of State Grid Gansu Electric Power Company (No. 522722160021).

Key words: islanded microgrid; time-delay system; small signal model; parameter optimization; system stability

0 引言

日益增长的可再生能源不断兴起, 如风力发电机, 光伏发电厂等分布式能源, 使得能源越来越清洁, 越来越高效^[1-2], 但不同于传统电网具有稳固的结构, 由于内部的控制回路和感应回路等相互作用, 微电网容易受到低频振荡的影响, 这些振荡现象会

削弱电能质量, 造成系统可靠性降低^[3-8]。因此微电网相对于传统电网而言, 系统参数要求更高, 其研究显得尤为必要。

近年来, 对于系统稳定性而言, 主要分析方法是小干扰稳定性分析, 其常用方法为特征值法, 该方法的前提是建立小信号模型。文献[9-10]针对分布式电源并联所构成的孤岛微电网系统, 针对系统参数变化, 分析了稳定性相应的变化特性。文献[10-11]将微电网当中的发电单元等效成同步发电机, 由此通过小信号模型进行模型建立。整个微电网系统推导成

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61663019); 国网甘肃省电力公司科技项目资助(522722160021)

一个简单的传递函数进行建模。虽然上述方法在孤岛微网系统研究分析当中起到了举足轻重的作用,但是微电网当中分布式能源还存在着延时问题,功率调节的作用相比于理想化的传递函数模型存在着时滞环节,即 PWM 时滞和数字电路采集方面的时滞,这种问题在逆变器控制当中尤为突出,并且延迟效应与内部控制回路的结合也会增加系统状态矩阵的阶数。由于仿真建模的要求越来越高,依靠传统模型得到的参数可能会给系统可靠性造成影响。因此有必要对更加贴近实际的系统(即含有时滞的系统)进行参数研究。文献[12]针对含有时滞环节的孤岛微电网系统,对 DG 出力、时间常数改变时的系统稳定性变化情况进行分析,得出了系统稳定性随着变流器功率响应的时滞常数逐渐增加($T_s=1/10000\text{ s}$, $1/8000\text{ s}$, $1/6000\text{ s}$)而逐渐变差的情况,也就是说系统时滞常数越大,系统稳定性越差。文献[13]基于电力电子的小时间常数提出了一种有效的小信号稳定性评估办法,分析了系统运行过程当中功率变化情况下,变流器功率响应的固有时滞对于系统的影响。上述文献开始考虑微网执行机构时滞问题,即变流器功率响应的固有时滞,使得微网模型越来越贴近实际。

但文献[12-13]没有给出控制器参数的设置方法。目前,文献[14]通过对微网小信号的建立,提出了一种逆变器控制参数的优化方法,对于逆变器的设计提供了研究思路。文献[15]在此基础上,对方法进行了改进,利用根轨迹的方法与粒子群的方法相结合,对控制器参数进行了协调优化。上述文献均未在含有时滞微网系统(Time Delay Microgrid System, TDMS)进行参数分析,仅仅认为微网系统为非时滞微网系统(Non Time Delay Microgrid System, NTDS),然后利用非时滞微网系统进行分析,参数整定。但是,利用传统方法得到的微网参数代入实际系统当中,可能由于时滞的影响,特别是逆变器的执行机构时滞影响,其系统稳定性会发生改变,导致参数设置可能会出现偏差。因此对于实际的微网系统,其小信号模型参数设置需要进行重新优化,以便得到更加准确的结果。

本文充分考虑微网时滞的影响,建立了含有两个 DG 的小信号模型,引入了考虑 TDMS 优化模型,通过能够全面反映系统稳定性的目标函数的建立,并利用粒子群算法进行求解,最终得到更加准确的参数以提高系统稳定性,从而指导含微网孤岛运行参数设置,通过算例验证本文所提模型的有效性。

1 考虑时滞的孤岛小信号模型

如图 1 所示,由两个分布式电源(DG)及负荷构成的孤岛微网系统。图中: DG1、DG2 为分布式电源。当断路器处于断开情况时,系统进入孤岛微网模式运行,对于孤岛微电网的稳定分析,首先需建立小信号模型,下面对孤岛模式运行下的微网进行小信号建模。

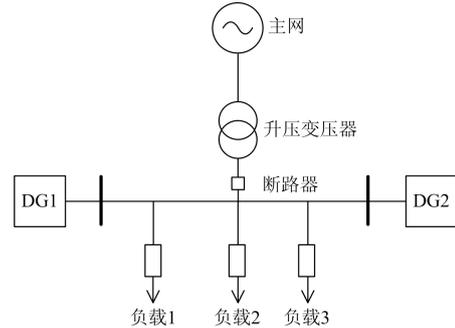


图 1 孤岛微网系统结构

Fig. 1 Structure of microgrid system in islanding mode

系统当中逆变器控制在并网情况下采用 PQ 方式,在孤岛模式下采用下垂控制方式,起到电压调节和频率调节的作用^[16]。

其逆变器控制及接口框图如图 2 所示,利用一阶简化模型来推导逆变器的小信号模型。本文分析过程当中需考虑逆变器时滞环节,因此利用 e^{-s} 来表示逆变器控制环节的时滞影响,逆变器在功率控制的过程当中,其时间滞后变化范围在 0~100 ms 之间。由于孤岛微电网相对于传统电网而言,系统网架比较薄弱,在受到负荷变化等小冲击的情况下,可能会导致系统稳定遭到破坏,所以考虑其时滞影响是很有必要。

由 DG、逆变电源以及负荷小信号模型组合,通过交流母线电压将各个 DG 连接起来形成完整的孤岛微电网小信号模型。在考虑时滞影响的情况下,其完整的小信号状态空间模型可由式(1)表示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}'_{inv} \\ \Delta \dot{i}'_{loadDQ} \end{bmatrix} = A'_{mg} \begin{bmatrix} \Delta x'_{inv} \\ \Delta i'_{loadDQ} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\Delta x'_{inv} = [\Delta x'_{inv1} \quad \Delta x'_{inv2}]^T$; 系数矩阵为

$$A'_{mg} = \begin{bmatrix} (A'_{inv} + B'_{inv} R_N M_{inv} C'_{inv})_{38 \times 38} & (B'_{inv} R_N M_{load})_{38 \times 2} \\ (B_{load1} R_N M_{inv} C'_{inv} + B_{load2} C'_{inv})_{2 \times 38} & (A_{load} + B_{load1} R_N M_{load})_{2 \times 2} \end{bmatrix}_{40 \times 40}$$

不含时滞模型的完整微电网小信号状态空间模型可由式(2)表示。

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x}_{inv} \\ \Delta \dot{i}_{loadDQ} \end{bmatrix} = A_{mg} \begin{bmatrix} \Delta x_{inv} \\ \Delta i_{loadDQ} \end{bmatrix} \quad (2)$$

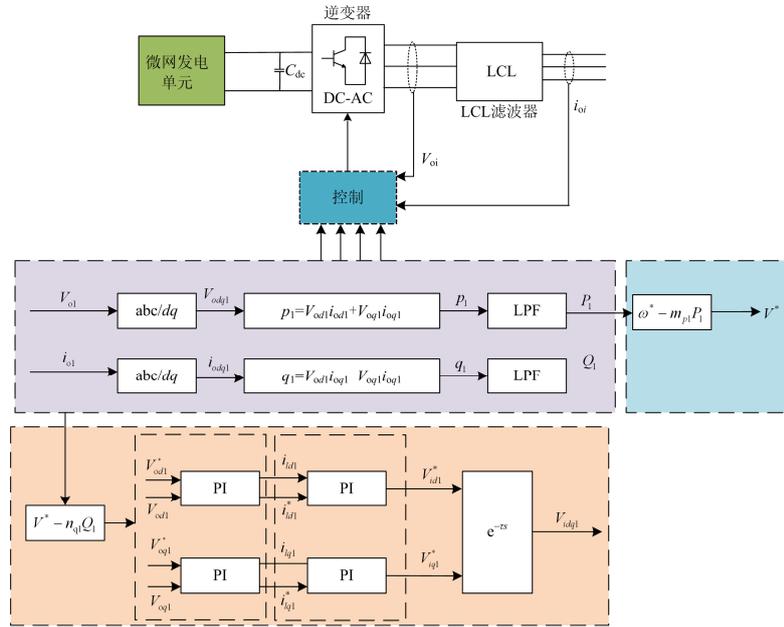


图 2 逆变器控制及接口框图

Fig. 2 Control and interface block diagram of inverter

式中: $\Delta x_{inv} = [\Delta x_{inv1} \quad \Delta x_{inv2}]^T$; 系数矩阵为

$$A_{mg} = \begin{bmatrix} (A_{inv} + B_{inv}R_N M_{inv} C_{inv})_{26 \times 26} & (B_{inv}R_N M_{load})_{26 \times 2} \\ (B_{load1}R_N M_{inv} C_{inv} + B_{load2}C_{inv\varphi})_{2 \times 26} & (A_{load} + B_{load1}R_N M_{load})_{2 \times 2} \end{bmatrix}_{28 \times 28}$$

对于并联的含有两个 DG(含逆变器)的状态矩阵为 40 阶(TDMS)和 28 阶(NTDMS), 详细推导过程见附录。

如图 3 所示, 系统在某一工况情况下, 计及 TDMS 在小干扰稳定性分析时存在两个不稳定点, NTDMS 的系统小干扰稳定性分析未出现不稳定情况。因此从理论上和仿真结果上, 逆变器的时滞环节均不可忽略。传统方法参数设置均是建立在 NTDMS 上, 原有参数设置方法得到的参数能否应用

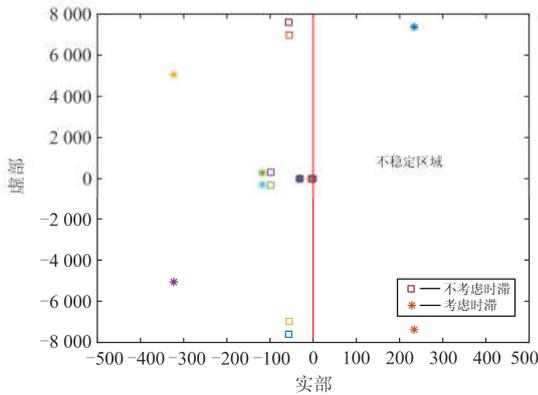


图 3 TDMS 和 NTDMS 完整模型极点分布图

Fig. 3 Pole distribution graph of a complete model with TDMS and NTDMS

于新的小信号模型值得进一步深入的研究。本文由此出发, 为贴近实际系统, 建立了 TDMS 小信号模型, 为时滞系统的小干扰分析建立基础。为其参数设置提供依据。

2 考虑逆变器时滞影响的孤岛微网小信号稳定分析

给定系统各参数值如表 1 所示。

表 1 DG1/DG2 系统参数

参数	数值	参数	数值
U/kV	0.4	R_1/Ω	0.2
L_1/mH	1.5	R_2/Ω	0.1
$C_1/\mu F$	250	$m/(rad/s/W)$	1×10^{-4}
L_2/mH	1.8	$n/1 \times 10^{-3} V/var$	1×10^{-3}
K_{pi}	1	K_{pv}	4
K_{ii}	0.04	K_{iv}	100

根据文献[12]可得, 变流器功率响应的固有时滞在 0~100 ms, 不失一般性, 在本文当中 DG1 和 DG2 的时间常数 T_s 均为 0.5×10^{-3} s, 即 0.5 ms 进行仿真。负荷相关参数, 负荷 1 为 10 kW, 负荷 2 为 20 kW+j8 kVar。负荷 3 暂不投入。系统选取基准值 $S_B = 100$ kVA, $\omega_B = 50$ Hz。

本节在上述孤岛微电网小信号稳定性模型的基础上, 研究负载变化、下垂系数变化以及逆变器控制参数变化情况下系统稳定性的差异。

1) 随着负载变化增加(由 0 增大至 40 kW), 如图 4 所示, 对于 NTDMS 系统, 由于特征根处于左半平面, 系统稳定性好, 而对于 TDMS 系统, 随负载变化, 特征根由左向右变化, 已进入失稳状态, 因此, 对于 TDMS 系统, 在负载变化情况下, 相对于 NTDMS 系统稳定裕度较差。

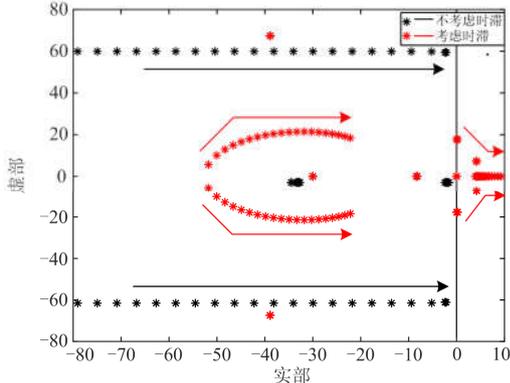


图 4 负载电阻 R_{load} 增大时的系统特征根轨迹

Fig. 4 Eigenvalues trace of microgrid when R_{load} increases

2) 随下垂系数变化, 如图 5 所示, 逆变器有功下垂系数 m_p 在 0~1 范围内变化时, 对于 NTDMS 系统, 始终保持稳定状态; 而对于 TDMS 系统, 由失稳状态逐渐进入稳定状态, 当 m_p 逐渐增大至 1.25×10^{-6} 时, 系统进入稳定状态。对于 TDMS 系统,

随着逆变器有功下垂系数的增大, 系统稳定性变好。

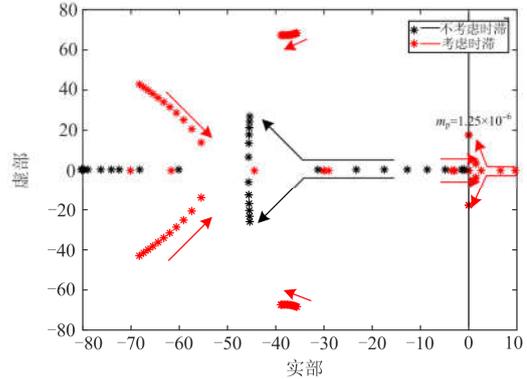


图 5 有功下垂系数 m_p 增大时的系统特征根轨迹

Fig. 5 Eigenvalues trace of microgrid when m_p increases

3) 对于 NTDMS, 选取合适的系统参数如表 1 来研究控制器参数 K_{pi} 、 K_{ii} 、 K_{pv} 、 K_{iv} 在区间[1, 200] 以步长为 8 进行改变得到的根轨迹图, 如图 6 所示, 可以观察到根轨迹有所变化, 但只是靠实轴方向运动并未出现失稳的状态, 对系统仅会带来振荡的风险, 对于系统的稳定裕度较高。而对于 TDMS, 随 K_{pi} 、 K_{ii} 、 K_{pv} 、 K_{iv} 在区间[1, 200]以步长为 8 进行改变得到的根轨迹图, 如图 6 所示, 可以观察到系统在 K_{pv} 、 K_{iv} 变化时, 系统进入失稳状态。因此, TDMS 在 K_{pv} 、 K_{iv} 变化情况下的稳定裕度较小。

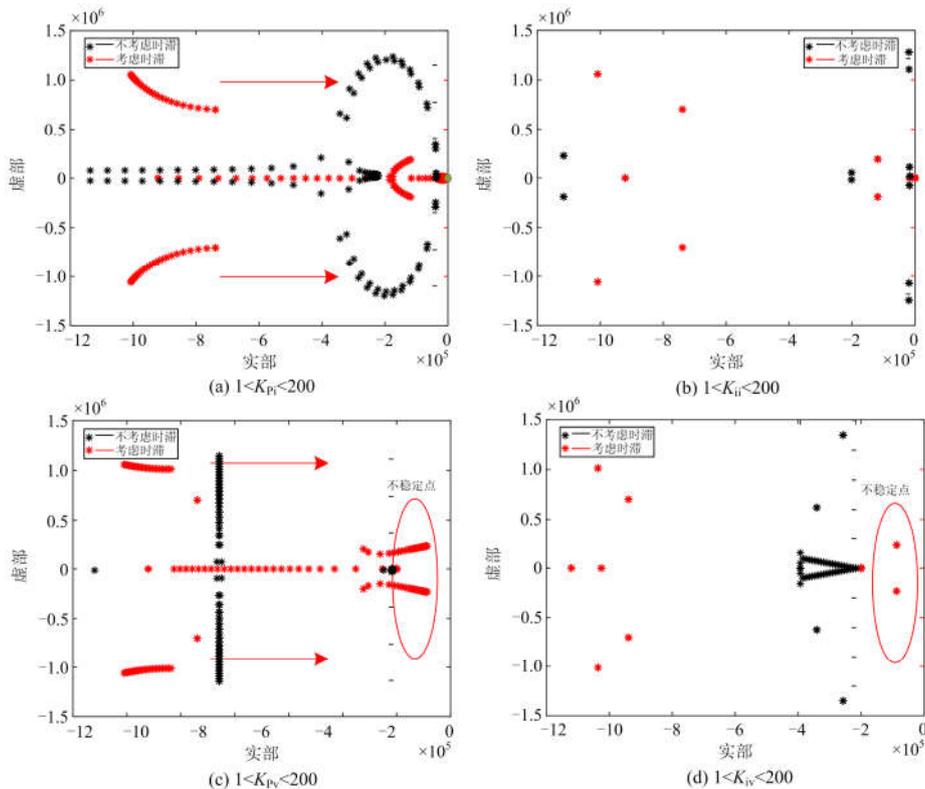


图 6 NTDMS 的系统根轨迹变化图

Fig. 6 Root locus change diagram of NTDMS

研究表明: 系统参数对于 TDMS 以及 NT DMS 系统均存在影响, 在选取合适的系统参数的情况下, 对于 TDMS 系统, 电压外环对特征值影响较显著, 对于系统稳定性影响较大, 而电流内环对系统阻尼可能会产生负面影响。对于 NT DMS 而言, 系统稳定裕度较高。

因此, 在选取合适的系统参数的情况下, 对于系统控制器参数而言, 利用原有的方法对系统参数进行优化得到的参数值代入实际系统当中, 可能由于电压环参数设置不合理, 导致系统处于不稳定状态。可见, 对于控制参数设置以及优化, 考虑时滞显得比较重要。本文从参数优化角度出发, 在计及时滞系统当中, 以系统稳定性为目标进行重新研究, 得到与实际系统相关的控制系统参数。

3 协调优化模型

对于孤岛微电网系统而言, 系统稳定性主要有三部分构成: 分别为小干扰稳定性、阻尼比以及稳定裕度, 由文献[4]可以推导得到目标函数如式(3)所示。

$$\begin{cases} J_1 = \sum_{\forall \alpha_i > 0} \mu_i \cdot \alpha_i \\ J_2 = \sum_{\forall \xi_j < \xi_0} \mu_j \cdot (\xi_0 - \xi_j) \\ J_3 = \sum_{\forall \alpha_k > \alpha_0} \mu_k \cdot (\alpha_k - \alpha_0) \\ \min J = \min(J_1 + J_2 + J_3) \end{cases} \quad (3)$$

式中, J 为协调优化目标函数。详细参数解释可参照文献[4]。

4 仿真测试

为了验证时滞系统对于仿真的影响, 根据图 1 所示的孤岛微电网发电系统, DG1 初始功率为 20 kW, DG2 初始功率为 10 kW, 代入 TDMS 以及 NT DMS 里进行仿真, 其中 TDMS 以及 NT DMS 仿真系数参数一致, 其中 DG1 和 DG2 的时间常数 T_s 均为 0.5×10^{-3} s。

由图 7 可以看出, 系统在 NT DMS 模型下, 系统稳定性很好, 系统在 0.18 s 左右 DG1 达到稳定出力 20 kW, DG2 达到稳定出力 10 kW。利用相同的参数代入到 TDMS 系统里面如图 8 所示。由图 7 可知系统, 由于控制系统执行机构的时滞影响, 脉宽调制产生器产生的控制波形将会受到巨大影响, 导致系统时滞影响逐渐累加, 最终导致系统失稳。

由以上可知, 系统在有时滞系统以及非时滞系统系统的参数设置是不一致的, 为此利用本文提出的参数优化方法进行优化计算。

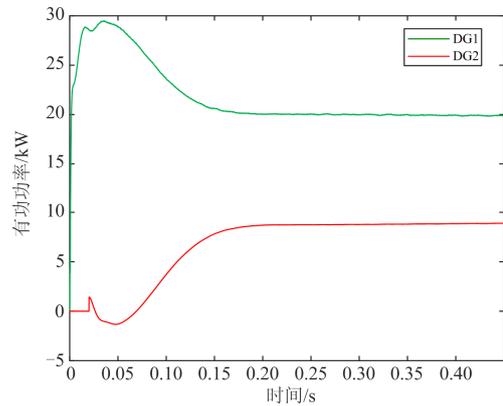


图 7 NT DMS 系统特性曲线

Fig. 7 NT DMS system characteristic curve

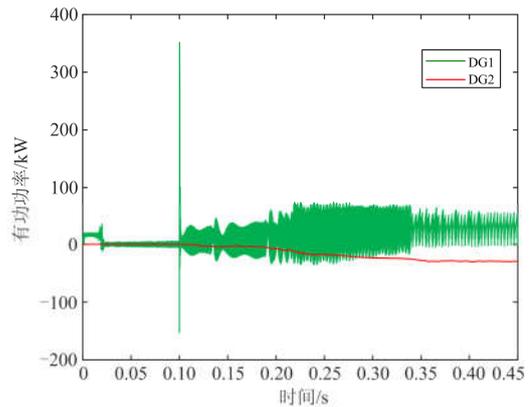


图 8 TDMS 系统特性曲线

Fig. 8 TDMS system characteristic curve

采用 PSO 优化算法实现对 NT DMS 和 TDMS 分别进行控制参数的协调优化, 迭代曲线如图 9 所示。算例中 PSO 参数参考文献[17-20]。迭代 60 次, 控制器参数优化结果如表 2 所示。

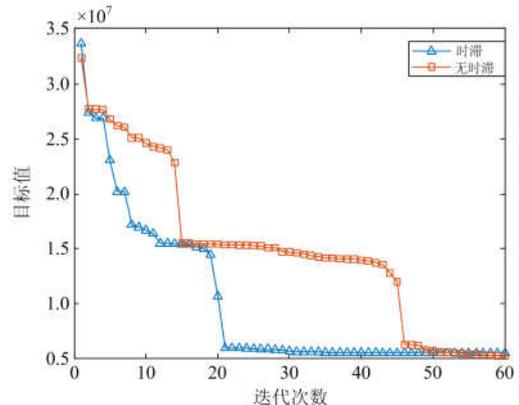


图 9 TDMS 和 NT DMS 参数优化迭代曲线

Fig. 9 TDMS and NT DMS parameter optimization iterative curves

表 2 优化前后的 TDMS 和 NTDS 控制参数

Table 2 TDMS and NTDS control parameters before and after optimization

DG1	K_{pv}	K_{iv}	K_{pi}	K_{ii}
优化前	1	4	0.04	100
TDMS 优化后	3.31	200	0.91	200
NTDS 优化后	0.01	200	0.31	120.28
DG2	K_{pv}	K_{iv}	K_{pi}	K_{ii}
优化前	1	4	0.04	100
TDMS 优化后	3.93	200	0.71	200
NTDS 优化后	3.53	165.30	0.63	200

由表 2, 可以看出电压电流 PI 参数区别很大, 把按照 NTDS 进行优化得到的控制参数代入至 TDMS 当中进行小信号分析, 得到如图 10 所示结果, 由图 10 可知, 利用已有的参数优化方法将有可能得到错误的结果, 不考虑时滞情况下可能系统均是稳定的, 但是在计及时滞环节的过程当中, 利用原有的参数, 15,16,19,20 特征根在右半平面, 系统处于非稳定状态。

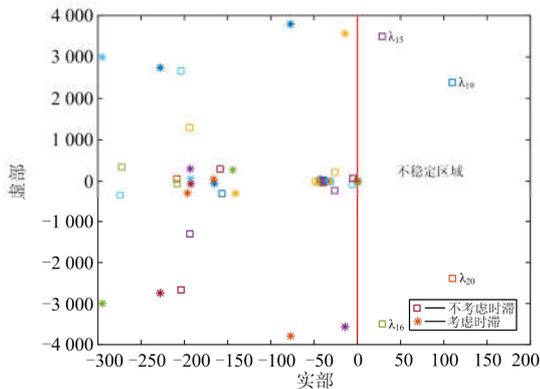


图 10 特征根对比图

Fig. 10 Characteristic root contrast diagram

把利用 NTDS 得到的参数以及 TDMS 得到的参数分别代入系统进行仿真, 孤岛微电网在运行过程中, 受到外界因素的影响会导致输出功率的改变。系统在 0.3 s 时刻由 30 kW 提高至 35 kW。

仿真结果表明: 利用 TDMS 的参数代入孤网系统(含时滞环节)当中得到的 DG 出力动态响应图如图 11 所示, 系统刚开始 30 kW 负载, DG1 出力 20 kW, DG2 出力 10 kW, 系统能在 0.2 s 稳定, 受到干扰以后, 由于下垂系数 1:1, DG1、DG2 出力各增加至 22.5 kW、12.5 kW, 系统处于稳定状态; 把 NTDS 的参数代入孤网系统当中得到 DG 出力动态响应图如图 12 所示, 系统有功出力在 1 s 以前没有大幅度失稳, 但是有功出力并未按照系统负荷

来进行安排, 1 s 以后系统逐步失稳, 主要体现在 DG1 失稳导致 DG2 小幅振荡, 与特征根分析得到优化结果结论吻合。

为了进一步验证优化参数的正确性, 对于含有时滞的实际系统而言, 利用 TDMS 的参数代入系统当中做进一步验证仿真, 系统在 0.3 s 时刻由 30 kW 减小至 25 kW。

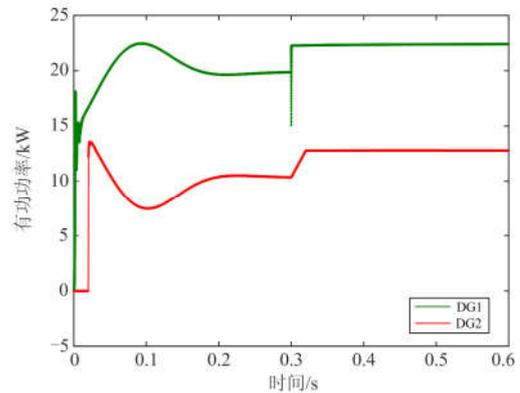


图 11 TDMS 优化参数功率突变下系统动态响应

Fig. 11 TDMS optimization of dynamic response of the system under the power mutation

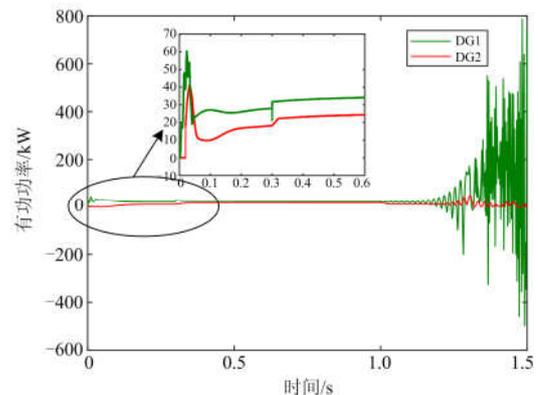


图 12 NTDS 优化参数功率突变下系统动态响应

Fig. 12 NTDS optimization of dynamic response of the system under the power mutation

仿真结果表明: 利用 TDMS 的参数代入孤网系统(含时滞环节)当中得到的 DG 出力动态响应图如图 13 所示, 系统刚开始 30 kW 负载, DG1 出力 20 kW, DG2 出力 10 kW, 系统能在 0.2 s 稳定, 受到干扰以后, 由于下垂系数 1:1, DG1、DG2 出力减小至 17.5 kW、7.5 kW, 系统处于稳定状态。

由上述分析可见 TDMS 优化参数代入到实际系统当中可以稳定运行, 而如果按照原有方法将参数代入系统当中, 系统将会出现失稳状态。由此, 系统在实际参数整定的时候有必要考虑时滞系统的影响。

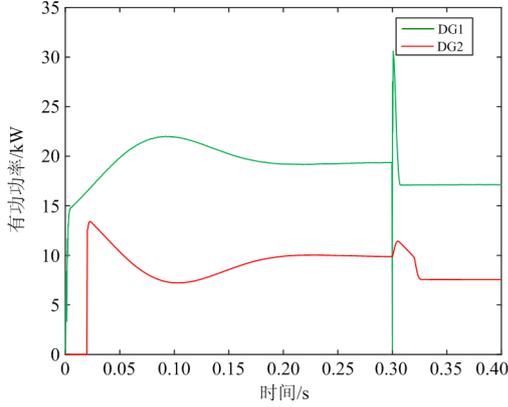


图 13 TDMS 优化参数功率突变下系统动态响应

Fig. 13 TDMS optimization of dynamic response of the system under the power mutation

5 结论

本文首先通过建立 TDMS 以及 NTDMS 包含 DG1 和 DG2 负荷的小信号数学模型, 准确地得到系统的特征根; 并利用粒子群优化算法得到控制器优化参数。通过比较参数在系统(含时滞以及不含时滞)当中的稳定性以及在功率突变情况的实际仿真测试结果, 得到如下结论:

1) 从模型本身, TDMS 更贴近实际孤岛微网系统, 通过时滞模型揭示了逆变器的执行机构时滞问题。

2) 就系统特性、特征根角度以及实际仿真系统而言, TDMS 优化得到的参数能应用于实际系统, 比传统方法更加准确。

因此, 本文所提出的采用基于 PSO 优化算法, 建立协调优化目标函数, 得到的含有时滞系统的小干扰稳定模型参数更贴近实际, 更能指导微网运行。

附录

ω_n 为微电网的额定角频率; U_0 为微电网的额定电压; m_p 为有功下垂特性系数; n_q 为无功下垂特性系数; ω_c 为低通滤波器的截止频率; $\Delta\omega_{com}$ 为公共参考坐标系的角频率偏差; U_{od} 、 U_{oq} 、 I_{od} 、 I_{oq} 、 K_{pi} 、 K_{ii} 、 K_{pv} 、 K_{iv} 均为初始稳态运行时的参数, R_f 为抑制滤波器振荡串入的阻尼电阻; R 、 L 为线路的电阻和电感, 微电网在初始稳态运行点的角频率为 ω_0 。

$$\mathbf{B}_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_c I_{od} & \omega_c I_{oq} & \omega_c U_{od} & \omega_c U_{oq} \\ 0 & 0 & \omega_c I_{oq} & -\omega_c I_{od} & -\omega_c U_{oq} & \omega_c U_{od} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_{inv} = \begin{bmatrix} (A_{inv1} + B_{1\omega_{com}} C_{inv\omega1})_{13 \times 13} & 0_{13 \times 13} \\ B_{2\omega_{com}} C_{inv\omega1} & A_{inv2} \end{bmatrix}_{26 \times 26}, \mathbf{B}_{inv} = \begin{bmatrix} B_{inv1} \\ B_{inv2} \end{bmatrix}_{26 \times 26}$$

$$\mathbf{C}_{inv} = \begin{bmatrix} C_{inv2} & 0_{2 \times 13} \\ 0_{2 \times 13} & C_{inv2} \end{bmatrix}_{4 \times 26}, \mathbf{R}_N = \begin{bmatrix} r_n & 0 \\ 0 & r_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{M}_{inv} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{M}_{load} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{inv\omega} = [C_{inv\omega1} \ C_{inv\omega2}]_{1 \times 26}$$

$$\mathbf{A}_{load} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{load}}{L_{load}} & \omega_0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_{load}}{L_{load}} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{load1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{load2} = \begin{bmatrix} I_{loadQ} \\ -I_{loadQ} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{inv\omega1} = [X_{po}]_{1 \times 3} \quad 0_{1 \times 2} \quad 0_{1 \times 2} \quad 0_{1 \times 6} \quad 0_{1 \times 13}$$

$$\mathbf{C}_{inv1} = [T_{i2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 2} \quad T_{2 \times 2}]_{2 \times 13}$$

$$\mathbf{A}_{inv1} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 & B_p \\ B_{u1} C_{pu} & 0 & 0 & B_{u2} \\ B_{i1} D_{u1} C_{pu} & B_{i1} C_u & 0 & B_{i1} D_{u2} + B_{i2} \\ \left\{ \begin{array}{l} B_{LW} D_{i1} D_{u1} C_{pu} + \\ C_{LW} [T_u^{-1} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1}] + \\ D_{LW} C_{po} \end{array} \right\} & B_{LW} D_{i1} C_u & B_{LW} C_i & A_{LW} + B_{LW} D_{i1} D_{u2} + \\ & & & B_{LW} D_{i2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{inv1} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} \\ (C_{LW} T_u^{-1})_{6 \times 2} \end{bmatrix}_{13 \times 2}, \mathbf{B}_{1\omega_{com}} = \begin{bmatrix} (B_{po})_{3 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \\ 0_{2 \times 1} \\ 0_{6 \times 1} \end{bmatrix}_{13 \times 1}$$

$$\mathbf{D}_{LW} = [i_{iq} \quad -i_{id} \quad v_{oq} \quad -v_{od} \quad i_{oq} \quad -i_{od}]^T$$

$$\mathbf{A}_{LW} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega_0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_0 & -\frac{R_f}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_0 & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & -\frac{R}{L} & \omega_0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & -\omega_0 & -\frac{R}{L} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{LW} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{LW} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L} \\ 0 & -\frac{1}{L} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{i1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{u2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{u1} = \begin{bmatrix} K_{pv} & 0 \\ 0 & K_{pv} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{u2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -K_{pv} & -\omega_n C_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_n C_f & -K_{pv} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{u1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{C}_u = \begin{bmatrix} K_{iv} & 0 \\ 0 & K_{iv} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{D}_{i1} = \begin{bmatrix} K_{pi} & 0 \\ 0 & K_{pi} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_i = \begin{bmatrix} K_{ii} & 0 \\ 0 & K_{ii} \end{bmatrix}, \mathbf{D}_{i2} = \begin{bmatrix} -K_{pi} & -\omega_n L_f & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_n L_f & -K_{pi} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_p = \begin{bmatrix} 0 & -m_p & 0 \\ 0 & -\omega_c & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_c \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{po} = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{i2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_{po} = [0 \quad -m_p \quad 0], \mathbf{C}_{pu} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -n_q \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为了揭示时滞的影响, 时滞模型利用式(4)进行描述。

$$V_i = e^{-\tau s} V_i^* \quad (4)$$

式中: V_i 和 V_i^* 为逆变器的电压基准值以及逆变器电压输出值; $\tau=1.5T_s$ 为时滞时间常数。在本篇文章当中, 利用三阶 Pade 逼近法, 将其时滞模型式(4)进行分析, 可得其等效模型为式(5)。

$$e^{-\tau s} \approx \frac{20 - 60(\tau s) + 12(\tau s)^2 - (\tau s)^3}{120 + 60(\tau s) + 12(\tau s)^2 + (\tau s)^3} \quad (5)$$

由式(5)可以得到, 时间延迟的小信号模型可以用状态空间表示, 如式(6)。

$$\begin{aligned} \dot{x}_{\text{del}} &= A_{\text{del}} x_{\text{del}} + B_{\text{del}} V_i^* \\ V_i &= C_{\text{del}} x_{\text{del}} + D_{\text{del}} V_i^* \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $x_{\text{del}}=[x_{dq1}, x_{dq2}, x_{dq3}]^T$ 为式(8)的状态变量; A_{del} 、 B_{del} 、 C_{del} 、 D_{del} 为时滞模型的参数, 如式(7)、式(8)所示。

$$\begin{aligned} A_{\text{del}} &= \begin{bmatrix} A_d & \\ & A_q \end{bmatrix}, B_{\text{del}} = \begin{bmatrix} B_d & \\ & B_q \end{bmatrix} \\ C_{\text{del}} &= \begin{bmatrix} C_d & \\ & C_q \end{bmatrix}, D_{\text{del}} = \begin{bmatrix} D_d & \\ & D_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{cases} A_d = A_q = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -120/\tau^3 & -60/\tau^2 & -12/\tau \end{bmatrix} \\ B_d = B_q = [0 \ 0 \ 1]^T \\ C_d = C_q = \begin{bmatrix} 240/\tau^3 & 0 & -24/\tau \end{bmatrix}^T \\ D_d = D_q = [-1] \end{cases} \quad (8)$$

$$A'_{\text{inv}} = \begin{bmatrix} (A'_{\text{inv}1} + B'_{1\omega_{\text{com}}} C'_{\text{inv}\omega 1})_{19 \times 19} & 0_{19 \times 19} \\ B'_{2\omega_{\text{com}}} C'_{\text{inv}\omega 1} & A'_{\text{inv}2} \end{bmatrix}_{38 \times 38}$$

$$C'_{\text{inv}} = \begin{bmatrix} C'_{\text{inv}C1} & 0_{2 \times 19} \\ 0_{2 \times 19} & C'_{\text{inv}2} \end{bmatrix}_{4 \times 38}, B'_{\text{inv}} = \begin{bmatrix} B'_{\text{inv}1} \\ B'_{\text{inv}2} \end{bmatrix}_{38 \times 2}$$

$$C'_{\text{inv}\omega} = [C'_{\text{inv}\omega 1} \ C'_{\text{inv}\omega 2}]_{1 \times 38}$$

$$A_{\text{mn}} = \begin{bmatrix} A_p & 0 & 0 & B_p \\ B_{u1} C_{\text{pu}} & 0 & 0 & B_{u2} \\ B_{i1} D_{u1} C_{\text{pu}} & B_{i1} C_u & 0 & B_{i1} D_{u2} + B_{i2} \\ \left\{ \begin{array}{l} B_{LW} D_{i1} D_{u1} C_{\text{pu}} + \\ C_{LW} [T_u^{-1} \ 0_{2 \times 1} \ 0_{2 \times 1}] + \\ D_{LW} C_{\text{po}} \end{array} \right\} & B_{LW} D_{i1} C_u & B_{LW} C_i & A_{LW} + B_{LW} D_{i1} D_{u2} + \\ & & & B_{LW} D_{i2} \\ A_{i1} & & A_d & 0 \\ A_{i1} & & 0 & A_q \end{bmatrix}$$

$$A_{t1}(1:2, 1:13) = 0$$

$$A_{t1}(3, 1:13) = K_{\text{pi}} \cdot A'_{\text{invn}}(7, 1:13)$$

$$A_{t1}(3, 8) = A'_{\text{invn}}(19, 8) + \omega_n C_f$$

$$A_{t1}(3, 7) = A'_{\text{invn}}(19, 7) + K_{\text{ii}}$$

$$A_{t2}(1:2, 1:13) = 0$$

$$A_{t2}(3, 1:13) = K_{\text{pi}} \cdot A'_{\text{invn}}(6, 1:13)$$

$$A_{t2}(3, 6) = A'_{\text{invn}}(16, 6) + K_{\text{ii}}$$

$$A_{t2}(3, 7) = A'_{\text{invn}}(16, 7) + \omega_n C_f$$

$$C'_{\text{inv}\omega 1} = [(X_{\text{po}})_{1 \times 3} \ 0_{1 \times 2} \ 0_{1 \times 8} \ 0_{1 \times 6}]_{1 \times 19}$$

$$C'_{\text{inv}1} = [[T_{12 \times 1} \ 0_{2 \times 1} \ 0_{2 \times 1}]_{2 \times 3} \ 0_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 8} \ [0_{2 \times 2} \ 0_{2 \times 2} \ T_{2 \times 2}]_{2 \times 6}]_{2 \times 19}$$

参考文献

- [1] 郑宏亮, 李兴旺, 王燕廷, 等. 微电网切换至孤岛运行时的小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 25-32.
ZHENG Jinghong, LI Xingwang, WANG Yanting, et al. Small-signal stability analysis of a microgrid switching to islanded mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 25-32.
- [2] 李聪. 基于下垂控制的微电网运行仿真及小信号稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [3] 范元亮, 苗逸群. 基于下垂控制结构微电网小扰动稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 1-7.
FAN Yuanliang, MIAO Yiqun. Small signal stability analysis of microgrid droop controlled power allocation loop[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 1-7.
- [4] 李奇, 杨寒卿, 韩莹, 等. 光伏并网发电系统参数协调优化方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(5): 894-901.
LI Qi, YANG Hanqing, HAN Ying, et al. Method of parameter coordination optimization for grid-connected photovoltaic system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(5): 894-901.
- [5] WANG Y, CHEN Z, WANG X, et al. An estimator-based distributed voltage-predictive control strategy for AC islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(7): 3934-3951.
- [6] 袁昊哲, 杨苹. 串联结构多微网并离网模式切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 94-100.
YUAN Haozhe, YANG Ping. Grid-connected and off-grid mode switching control strategies of multi-microgrid with series structure[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 94-100.
- [7] POGAKU N, PRODANOVIC M, GREEN T C. Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an

- inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(2): 613-625.
- [8] 肖朝霞, 王成山, 王守相. 含多微型电源的微网小信号稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 81-85. XIAO Zhaoxia, WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Small-signal stability analysis of microgrid containing multiple micro sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 81-85.
- [9] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [10] TANG X, DENG W, QI Z. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 698-706.
- [11] 张明锐, 黎娜, 杜志超, 等. 基于小信号模型的微网控制参数选择与稳定性分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 9-19. ZHANG Mingrui, LI Na, DU Zhichao, et al. Control parameter selection and stability analysis of microgrid based on small-signal model[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 9-19.
- [12] 周念成, 孟潇潇, 王强钢. 考虑逆变型分布式电源时滞的孤岛微网小信号稳定分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 20-25. ZHOU Niancheng, MENG Xiaoxiao, WANG Qianggang, et al. Small signal stability analysis of islanded microgrid considering time-delay effect of inverter interfaced distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 20-25.
- [13] WANG Y, WANG X, CHEN Z, et al. Small-signal stability analysis of inverter-fed power systems using component connection method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5301-5310.
- [14] 熊连松, 刘小康, 卓放, 等. 光伏发电系统的小信号建模及其控制器参数的全局优化设计方法[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1234-1241. XIONG Liansong, LIU Xiaokang, ZHUO Fang, et al. Small-signal modeling of photovoltaic power generation system and global optimal design for its controller parameters[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1234-1241.
- [15] 黄素娟, 窦晓波, 焦阳, 等. 双主电源并联运行的微电网小信号稳定性分析与控制参数优化[J]. 电测与仪表, 2017, 54(13): 36-43. HUANG Sujuan, DOU Xiaobo, JIAO Yang, et al. Small signal stability analysis and control parameters optimization of micro-grids based on paralleled dual power[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(13): 36-43.
- [16] 张建华, 苏玲, 刘若溪, 等. 逆变型分布式电源微网小信号稳定性动态建模分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 97-102. ZHANG Jianhua, SU Ling, LIU Ruoxi, et al. Small-signal dynamic modeling and analysis of a microgrid composed of inverter-interfaced distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(22): 97-102.
- [17] 明杰, 向红吉, 戴朝华, 等. 大规模风电接入的运行场景无功优化评估[J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2737-2742. MING Jie, XIANG Hongjie, DAI Chaohua, et al. Operation scenario reactive power optimization assessment with large-scale wind farm integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2737-2742.
- [18] 王树东, 杜巍, 林莉, 等. 基于合作博弈的需求侧响应下光储微电网优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 129-137. WANG Shudong, DU Wei, LIN Li, et al. Optimal allocation of photovoltaic energy storage microgrid under the demand side response based on cooperative game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 129-137.
- [19] 苏廷, 周立栋, 陆海, 等. 基于改进混沌粒子群算法的多源独立微网多目标优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 34-41. SU Shi, ZHOU Lidong, LU Hai, et al. Multi-objective optimization method of multi-source independent microgrid based on modified CPSO[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 34-41.
- [20] 刘梦璇, 王成山, 郭力, 等. 基于多目标的独立微电网优化设计方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 34-39. LIU Mengxuan, WANG Chengshan, GUO Li, et al. An optimal design method of multi-objective based island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 34-39.

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2018-07-23

作者简介:

刘一鸣(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网与控制, 电力系统建模, 分布式发电与微电网; E-mail: 376650812@qq.com

李彦哲(1966—), 女, 博士, 教授, 研究方向为智能电网, 新能源发电与微电网技术等; E-mail: a525721810@163.com

董海鹰(1966—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制等。

(编辑 周金梅)